

人間型対話ロボットのための協調的体動作の利用

神田 崇行^{*1} 鎌島 正幸^{*1*2} 今井 倫太^{*1*2} 小野 哲雄^{*1*3}
坂本 大介^{*1*3} 石黒 浩^{*1*4} 安西 祐一郎^{*2}

Embodied cooperative behavior for a humanoid robot that communicate with humans

Takayuki Kanda^{*1}, Masayuki Kamashima^{*1*2}, Michita Imai^{*1*2}, Tetsuo Ono^{*1*3},
Daisuke Sakamoto^{*1*3}, Hiroshi Ishiguro^{*1*4} and Yuichiro Anzai^{*2}

This paper reports the findings of a humanoid robot that pretends to listen to humans by effectively using its body properties in a route guidance situation. A human teaches a route to the robot, and the developed robot behaves as a human-like listener by utilizing both temporal and spatial cooperative behaviors to demonstrate that it is indeed listening to its human counterpart. The robot consists of many communicative units and rules for selecting appropriate units. A communicative unit realizes a particular cooperative behavior such as eye-contact and nodding, found through previous research. The rules for selecting communicative units were retrieved through WOZ experiments. An experiment was conducted to verify the effectiveness of the developed robot, and, as a result, the robot with cooperative behavior received higher subjective evaluation, which is rather similar to a human listener. The detailed analysis showed that this higher evaluation was due mainly to body movements as well as utterances. On the other hand, subjects' utterance to the robot was promoted by the robot's utterances but not by the body movements.

Key Words: human-robot interaction, embodied communication, cooperative body movement

1. はじめに

近年のロボティクス関連技術の進展により、腕や頭部を持ち人間のように歩く二足歩行ロボット [1] や外見が人間に酷似したアンドロイドロボット [2] が開発されるようになってきている。このようなロボット研究は「コミュニケーションロボット」という新しいロボット研究の方向性を示唆するものである。コミュニケーションロボットは、人間の日常生活の場において人間のパートナーとして活動し、物理的支援を行うだけでなく、コミュニケーションにおいても情報支援を行うロボットである。例えば、ロボットの身体を活用したコミュニケーションにより、コンピュータを使うのが苦手な人も容易に情報ネットワークにアクセスできる、といった理想的なメディアとしての可能性を持っている。

特に、最近の HCI (human-computer interaction) 分野の研

究から情報を媒介するインタフェースとしてのロボットの有用性が明らかになりつつある。Nass らは、コンピュータが従来のテレビやラジオのように情報を媒介する新しいメディアであることを示した一連の研究の中で、テキストのみのシンプルなインタフェースであっても、人は他の人に対して振舞うときと同様にコンピュータに対しても対人的に振舞うことを明らかにした [3]。さらに、身体性エージェントに関する Cassell らの一連の研究は、頭部や腕といった擬人的な表現を用いる擬人化エージェントはコンピュータエージェントと人との間の効率的な情報伝達を実現することを明らかにした [4] [5]。そして、実ロボットとコンピュータ上のエージェントを比較した研究において、コンピュータ上のエージェントよりも実空間に存在するロボットの方が実空間上の物体に関する対話に適していることが見出されている [6]。

人と対話するロボットはこれまでも研究が盛んに行われており、主に人間型ロボットとペット型ロボットが開発されてきた。ペット型ロボットの利用目的は触れ合いによる癒しやメンタルケア、エンターテイメント目的での人との対話が中心であったが、人間型ロボットはさらに案内 [1] [7] や情報提供といった擬人的な身体を活用した高度な対話への利用が試みられている。

これらの研究が示唆するように、ロボットが人間に似た身体を持つことの一つの意義は、人間とのコミュニケーションにあ

原稿受付

*1 ATR 知能ロボティクス研究所

*2 慶應義塾大学

*3 公立はこだて未来大学

*4 大阪大学

*1 ATR Intelligent Robotics & Communication Laboratories

*2 Keio University

*3 Future University-HAKODATE

*4 Osaka University



Fig. 1 Embodied cooperative behaviors in human-human communication

ると考えられる。人間に似た身体を持つロボットは言語情報に加えて豊富な非言語情報をもたらし、人間同士が会話するような自然で円滑な対話を可能にする。これまでも、身体を用いたロボットのコミュニケーションが研究されてきた。たとえば、視線を対話相手に向けてアイコンタクトを行うことで、ロボットは自らのコミュニケーション意図を人に伝え、人間と自然に対話することが可能になる [8]。この他にも、視線を用いる対話ロボットに関しては、これまでも音声と視覚による人物追従 [9] など多くの研究が行われている。また、共同注意 [10] [11]、アイコンタクト、うなずき [12]、顔の表情 [13]、腕の動き [14] など身体を使った相互作用行動の重要性が見出されている。

さらに、対話場面における互いの身体動作の関りあいの重要性も研究されている。これまでの、人同士の相互作用の解析を通じた身体的コミュニケーションに関する研究では、協調的な身体動作の重要性が指摘されている [15]。また、道案内の場面对象にした場合にも、互いにある方向を示しあう、といった教える側と聞き手側の間に協調的な身体動作が見られる場面が観察されている (図 1)。このような協調的な身体動作は、人とロボットとの相互作用においても見出されている。小野らの道案内の場面での実験において、ロボットがアイコンタクトを交え、身体の向きを調整し、また腕によって方向を示すゼスチャを伴って道案内をした場合に、人の協調的な身体動作が表出することが見出された [7]。このように、ロボットが「話し手」として振舞う際に身体を適切に動作させることは、「聞き手」である人の協調的な動作を誘発し、人-ロボットコミュニケーションを円滑にする。無論、このような協調動作は、自律対話型ロボットとの相互作用においても重要である [16]。

一方、ロボットが「聞き手」として「話し手」である人間に対して、協調的な身体動作を行うことの効果や、その動作方法についての研究は少ない。渡辺らの開発したうなずきロボットは、人間の「話し手」の音声情報に「聞き手」としてロボットの身体を利用してうなずくことで対話を円滑にすることを試みている [12]。しかし、このような協調はタイミングに関する時間的なものであり、「話し手」の身体動作といった空間的な協調はこれまでの研究では考慮されてこなかった。

本研究では、道案内の場面を題材に「聞き手」として話を聞いてくれるロボット、あるいは言語的には理解していないという意味では「聞いたふりをする」ロボット、を実現するための互いの身体動作を利用した自律対話ロボットの動作メカニズム

を提案し、その有効性を検証することを試みる。具体的には、開発したロボットは自然に話を聞いているように振舞うために、身体動作と音声の二つのモダリティを通じて自律的に反応を返す。このためのロボットの協調的動作の個別要素、たとえばアイコンタクトやうなずきは、様々な従来研究からの知見に基づきボトムアップに準備した。また、これらの要素の選択のために、あらかじめ Woz 法により行った実験結果から、人間のオペレータが行った行動選択の結果を抽出し、ルール化してロボットに実装した。

なお、このような人間からロボットへの道案内は以下のような主に 2 つの状況で生じると考えられることから、ロボットが人間の説明を「聞いている」ことを表現することが重要になると考える。第一に、人がロボットに作業を依頼する場合である。グラフィカルユーザインタフェースなどによる指示方法も考えられるが、もっとも直感的で誰でも分かる指示方法は、人間同士が対話するように話すことで指示する方法だといえる。第二に、相互確認の場面である。将来、ロボットが人間に道を教える状況はしばしば生じることが想像できるが、この際にロボットが一旦教えた道を、逆に人が確認のためロボットに「つまり、まっすぐ行って、右に曲がると目的地だね」といった説明を行うことが想定される。実際に、人間同士の対話では「教え手が一方的に説明」「聞き手が教え手に理解したことを確認するために説明」といったフェーズの交替現象が見られることがある。

本研究の目的は、このタスク設定を通じて、人と対話する理想的なインタフェースとしてのコミュニケーションロボットに必要な、身体を伴った相互作用メカニズムを見出すことにある。また、その評価実験は、本手法の有効性と、開発したロボットの身体動作と音声の人が主観と行動に与える影響を検証するものである。本研究は、コミュニケーションロボットの基本機能を逐次的に確認しながら積み上げるという意味でも、重要であり、コミュニケーションロボットの研究開発に貢献するものである。

2. システム構成

本研究では協調的身体動作を行う人間型対話ロボットシステムを開発した。具体的には、人間が道案内をする際に、その説明を協調的な身体動作を交えながら人間型ロボットが「聞いたふり」のための行動を表出することで、人間との円滑なコミュニケーションを実現するシステムである。図 2 に本システムの概要と構成要素を示す。以下では、本システムの設計方針と、システムの構成要素と、システム実現のために行った実験について報告する。

2.1 設計方針

本システムの基本的な設計方針は、腕や頭部の動きに関して従来研究から重要とされる大きな動きを伴う協調的な身体動作 (たとえば、アイコンタクト、同調的な指差し、など) と基本的なあいづち発話を基本要素とし、これらを組み合わせることにより、人間同士が会話しているような状況での聞き手側の人間の応答的な行動をロボットに実現することにある。そこで、これらの基本要素を「コミュニケーションユニット」と名づけ、

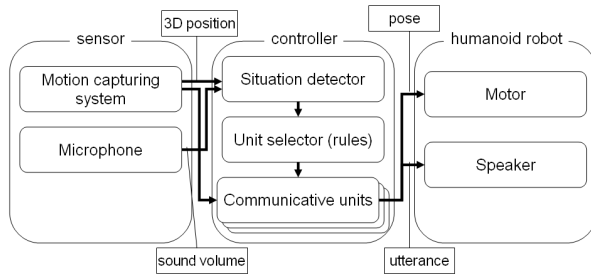


Fig. 2 System configuration

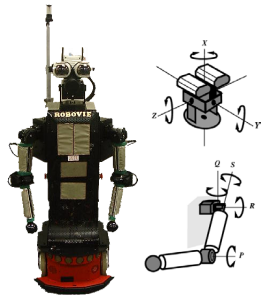


Fig. 3 Humanoid robot "Robovie"

現在の話し手の人間の状態や、ロボットの過去の状態に応じて逐次的に切り替えることで、このような「聞いたふり」行動の実現を目指した。

なお、本システムの実現にあたって、顔の表情など、より微小な動作や、冗長となるような行動は対象外とした。冗長な行動例としては「うん」「うんうん」という発話以外にも「はい」と発話する要素行動などが考えられる。また、身体動作に関しても、従来の知見で取り上げられていない重要性のやや劣る動作も対象外としている。これは、本研究で提案する枠組みによりロボットが「聞いたふり行動」をすることが出来ることを示すために、最小限必要な要素を取り上げたと言える。人間は会話の際にこれら以外の動作も利用しているため、本手法により「聞いたふり」行動が実現できることが示されれば、これらの要素を追加することでさらなる性能向上が目指せるものと考えられる。

2.2 ハードウェア構成

Robovie(図3)[17]はコミュニケーション機能に重点を置き擬人化しやすい外見を持つ上半身人型のロボットである。具体的には、3自由度の首、片側4自由度の腕を持ち、腕や頭部によるゼスチャのために必要な身体表現能力を備えている。高さは1.2m、半径0.5m、重量約40kgである。

本システムのセンサとしては、モーションキャプチャシステム(motion capturing system)およびマイクロフォンを用いた。モーションキャプチャシステムは、環境に設置された12台の赤外線照射機能付きの赤外線カメラと、赤外線を反射するマーカから構成される。全てのカメラ画像上での各マーカの2次元位置をもとに各マーカの3次元位置が自動的に計算され、出力される。モーションキャプチャシステムの環境への取り付けおよび各マーカの人とロボットへの取り付け位置は図4の通りである。本研究の実験環境およびマーカ取り付け状況にお

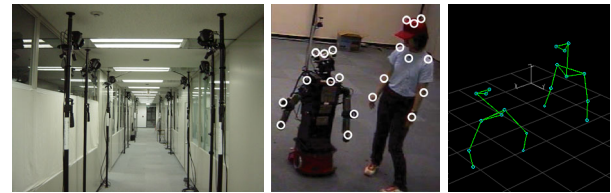


Fig. 4 Motion capturing system(left) and attached markers(center) and obtained 3-D numerical position data of body movement(right)

Table 1 Implemented communicative units

right arm	left arm
same motion as human's right hand (Rsr)	same motion as human's left hand (Lsl)
same motion as human's left hand (Rsl)	same motion as human's right hand (Lsr)
points the direction indicated with right hand (Rpr)	points the direction indicated with right hand (Lpr)
points the direction indicated with left hand (Rpl)	points the direction indicated with left hand (Lpl)
Do-nothing (Rno)	Do-nothing (Lno)
head	utterance
eye contact (Hec)	say "eh?" (Seh)
looks in the direction indicated with right hand (Hrp)	says "un." (Sun)
looks in the direction indicated with left hand (Hlp)	says "unun." (Suu)
nod (Hnd)	says "sorede." (Ssd)

いて、時間分解能は60Hz、時間遅れ約50ms、空間分解能約1mmで、各マーカの3次元位置が取得される。マイクロフォンはロボットに取り付けられ、人間の発話音量を取得するために用いられた。

2.3 協調動作のための要素行動「コミュニケーションユニット」

渡辺らは、ロボットにうなずき動作を持たせることによって人間とロボットとのコミュニケーションが円滑になることを見出した[12]。このように、相手の行動に対して、適切なタイミングで反応を返すような身体動作は、相手の行動に対してある程度の時間以内に反応を返す動作であることから、我々はこのような動作のことを時間的な協調動作と定義する。同様に、音声対話での「うん」「うんうん」といったあいづちも、音声による時間的な協調動作であるといえる。従来研究により、身体あるいは音声による時間的な協調動作の重要性は明らかになってきている。

一方、ロボットが人間に道を教えた小野らの従来研究において、多数の空間的な協調動作の発現が報告されている。ロボットが指し示したのと同じ方向を被験者が腕の動作により指し示すという腕による空間的な協調動作は10例中8例で生じていた[7]。このような空間的な協調動作は、共同注意機構[18]においても、互いに同じ物や方向を見る、指をさすといった頭部や腕の身体動作としても観察される。

我々は、これらの従来研究で見出されてきた時間的・空間的な協調動作をロボットの要素行動として利用する。そこで、ひとつの協調動作を実現する要素行動をコミュニケーションユニット(communicative unit)と名づけ、左右の腕、頭部、発話に

関するコミュニケーションユニットをそれぞれ逐次的に切り替えながら実行し続けることによりロボットの「聞いたふり」行動の実現を試みた。なお、コミュニケーションユニットは、従来研究 [19] においてコミュニケーションユニットとして報告された自律対話型ロボットのための対話的身体動作を実現するための要素行動と同一の概念を表す要素行動であり、将来的には対話型ロボットが備えるであろう基本的な身体動作実現のための要素行動となることを想定している。つまり、本研究においてモーションキャプチャシステムによって理想的な人間の動作に関する入力を得られた場合のコミュニケーションユニットの組み合わせ方法が定まることは、将来的に人間と様々な状況で自律的に対話するロボットの開発に応用が可能であると考えられる。

本研究では、個々のコミュニケーションユニットはモーションキャプチャシステムからのセンサ入力を利用して実装が行われた。表 1 にすべての実装したコミュニケーションユニットを示す。以降、コミュニケーションユニットは同表の括弧内に示された略称で表す。各コミュニケーションユニットは人間の実空間 3 次元座標を基にロボットの頭部および腕部の各関節の目標値を算出する。たとえば、ロボットの右腕を人間の右腕に同調させる動作を実現する“R_{sr}”例に取ると、

人間の右腕の身体の 3 次元座標から人間の肩、肘関節の角度を計算し、ロボットの右腕の角度に補正し、ロボットの右腕を動かす。

という処理により実現される。この際に、時刻 d 秒前の人間の座標を計算に利用することにより遅延時間 d を設ける。この遅延時間は、モーションキャプチャシステムが人間同士の対話で見られる反応時間よりも早い反応を示すため、これを防止するために設けられたパラメータである。もし、遅延時間 d を設けずに即時に人間の腕と同じ動きを行うといった協調的動作を行うと、かえってロボットの動作が不自然に見える（動作に反応していると言うよりも、単純に反射的に動いているように見える）ことが筆者らによって観察された。遅延時間 d は、他にも Rsl, Rpr, Rpl, Lsl, Lsr, Lpr, Lpl, Hec, Hrp, Hlp に実装される。また、うなずき (Hnd) のような動作は、センサ入力を利用せず、単にロボットの頭部を現在の角度から相対的に一時的に下を向けるような単純なモータ制御によって実現される。

2.4 遅延時間の計測

前節で定義した遅延時間 d を決定するため、人間同士の対話の際の反応・動作遅延時間を計測する実験を行った。

[測定手順] 被験者は 50 名 (男性 23 名, 女性 27 名) の大学生, 大学院生である。測定の際には部屋 ($8m \times 15m$) の 4 隅に難読漢字の書かれたポスター P1, P2, P3, P4 を設置し, 2 人の被験者 S1, S2 は部屋の中央に対面して立たせた。S1 の被験者が P1 を指差し「この漢字は と読みます」と言う疑似タスクを行わせた。P2, P3, P4 も P1 と同様の事を行わせた。また本実験では実験中 S1, S2 の動作をモーションキャプチャシステムで記録した。そして、疑似タスクを行わせた際の人間の反応遅延時間を測定した。実験の様子を図 5 に示す。

[遅延時間算出方法] 反応遅延時間はモーションキャプチャシステムから得られたデータを基に, S1 の腕が動き始める時間と,

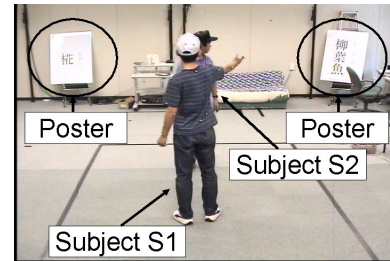


Fig. 5 Measurement of humans' response delay

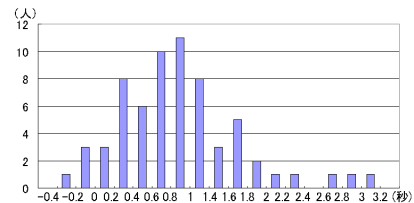


Fig. 6 Distribution of humans' response delay

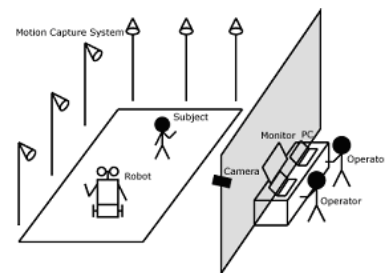


Fig. 7 Settings for Woz experiment

ポスターの方を向き始める時間を比較し、早く動き始めた方から S2 がポスターの方を向き始めるまでの時間を反応遅延時間として算出した。

[測定結果] 全ての被験者について、上述の測定方法にしたがって、相手に指示をされてから反応するまでの平均時間を求めた結果を図 6 に示す。この実験の結果、人間が相手に指示をされてから反応するまでの平均遅延時間は 0.89 秒 (標準偏差 0.63) であることがわかった。よって、ロボットの利用する遅延時間パラメータ d を 0.89 秒と定めた。

これにより、ロボットに平均的な人間と同じ遅延時間で反応するような振る舞いを実現することができる。将来的には、この遅延時間を変化させることにより、動きの鈍い反応、すばい反応といったものを作り出し、状況に応じてより話し手に適切なロボットの振る舞いを実現する応用可能性がある。

2.5 要素行動選択ルールの抽出

コミュニケーションユニット選択のルールを抽出するため、コミュニケーションユニットのみが実装された状態の半自律のロボットシステムを用い、人間の被験者がロボットに道案内をする実験を行った。コミュニケーションユニットの選択は WOZ 法により人間のオペレータが行った。実験結果の詳細は [20] [21] にも既に報告されているが、本稿では後の完全自律化の実装にとってこの結果が重要であるため、本稿でも再び得られた知見について報告する。

Table 2 Results for preliminary experiment (comparison among Human (H) condition, Robot cooperative (Rc) condition and Robot static (Rs) condition)

	Q.1	Q.2	Q.3	Q.4	Q.5	Q.6
question	Did you easily recall the route to teach?	Did you easily teach the route?	Do you think the hearer heard your guidance?	Do you think the hearer understood the route?	Did you think you shared the route information with the hearer?	Did you understand the hearer's feelings?
H condition (25 subjects)	3.84(1.67)	4.28(1.61)	5.96(0.92)	4.68(1.22)	5.16(1.22)	4.80(1.13)
Rc condition (21 subjects)	3.38(1.75)	4.10(1.69)	5.67(1.13)	4.57(1.53)	4.90(1.38)	4.24(1.38)
Rs condition (20 subjects)	2.65(1.71)	3.30(1.52)	4.10(1.51)	3.70(1.68)	3.25(1.41)	3.20(1.40)
ANOVA results (F(2,63))	p=.083 (+) F=2.58	p=.127 (n.s.) F=2.13	p<.01 (**) F=14.33	p=.076 (+) F=2.69	p<.01 (**) F=12.28	p<.01 (**) F=8.31
Multiple Comparison	(H > Rs)		H > Rs Rc > Rs 1.7708 p _i .05	(H > Rs) 1.7303 p _i .05	H > Rs Rc > Rs 1.9231 p _i .05	H > Rc Rc > Rs 1.8316 p _i .05
MSe	3.0192 p _i .05					

[実験設定] 被験者は前節で示した実験に参加した 50 名 (男性 23 名, 女性 27 名) の大学生, 大学院生である。次章の実験と同様に, 被験者は目的地までの道順を覚えた後にロボットに教えるように教示され, WOZ 法により操作されたロボット (Rc 条件) と全く動作や音声による反応を行わないロボット (Rs 条件) のどちらかに道案内した。また, 2 人の被験者のペアのどちらか一方がもう一方の被験者に道案内を行った (H 条件)。被験者とロボットの身体にはモーションキャプチャシステムのマーカが取り付けられており (図 4), システムはこれらのマーカに関する 3 次元座標を取得してロボットを制御する。この際にどのコミュニケーションユニットによってロボットを制御するかは人間のオペレータによって制御される (図 7)。実験後, 被験者は以下の主観評価に関する質問紙に回答した。

- 情報伝達
 - 順路を思い出すのは簡単でしたか
 - 相手に順路を教えるのは容易でしたか
- 信頼感
 - 相手は話を聞いているように思いましたか
 - 相手は順路を理解しているように思いましたか
- 共感
 - 相手と情報を共有しているように感じましたか
 - 相手の気持ちが分かりましたか

[オペレータの操作] ロボットの操作は常に特定のオペレータ 2 名が行った。オペレータは, コミュニケーションユニットの選択のみを操作し, 腕や頭部の姿勢といった直接的な操作は行わなかった。これは, 後に完全自律の実装を行う際に, システムが扱うことの出来ない情報をもとにオペレータがロボットを操作してしまわないようにするためである。つまり, ロボットの空間的な協調動作はモーションキャプチャシステムからの入力をもとにシステムが自律的に制御し, 人間のオペレータはどの協調動作をどのタイミングで行うかの決定のみを行った。オペレータの操作結果は, 実験の様子のビデオ, モーションキャプチャシステムの出力, マイクロフォンから得られた音声データとともに記録された。

[実験結果] 被験者からの主観評価の結果を分散分析 (ANOVA) により分析したところ, 表 2 のような結果が得られた。具体的

には, Q.3, 5, 6 に有意差, Q.1, 4 に有意傾向が見られた。そこで, LSD 法による多重比較を行ったところ, H 条件及び Rc 条件への評価が Rs 条件よりも Q.3, Q.5, Q.6 において有意に高いことがわかった。また, H 条件の結果は Rc 条件よりも Q.1, 4 に関して有意に高いことが分かった。このように, 被験者による主観評価の比較の結果, 全く動作や音声による反応を行わないロボットに比べて, WOZ 法によって操作されたロボットは, 順路を理解して対話しやすい印象を与えた。つまり, コミュニケーションユニットの有効性が確認されたといえる。

[オペレータの操作の分析] オペレータの操作結果を分析することで, 次節に示す検出すべき状況とコミュニケーションユニット選択ルールを手動で抽出した。その結果, 以下のルールが得られた。

- 通常はアイコンタクトを維持する
- 腕を下ろしていた被験者が腕をあげて道を指し示した場合には, 同時に同じ方の腕で同じ方向を指さし, また指さし方向を見る
- アイコンタクトがしばらく途絶えるとアイコンタクトを再度行う
- 被験者が腕を動かし続けている間は, 同じ方の腕で同調動作を行う
- 腕の動作は, 被験者が近い場合にはぶつからないように異なる腕を用いる
- 腕の同調は, 被験者と向き合う身体の向きとなっている時は向きが鏡対照の同調の動きをする
- 被験者の説明の間に合わせて (= 発話の切れ目に合わせて), うなずき, あいづち発話を行う

2.6 状況検出器とコミュニケーションユニット選択ルール

前節で示したように, 人間のオペレータの行った操作のルールを分析して抽出することで, 検出すべき状況とルールが見出された。そこで以下のように, 必要な状況検出器とコミュニケーションユニット選択ルールをそれぞれ実装した。

[状況検出器] 状況検出器 (situation detector) は, 人間とロボットの個々の, あるいは互いの身体位置や動作の状態を検出する。ここで, 人間の身体動作の状態とは現在の身体動作の状態と過去の身体動作の状態からなる。現在の身体動作の状態は, モー

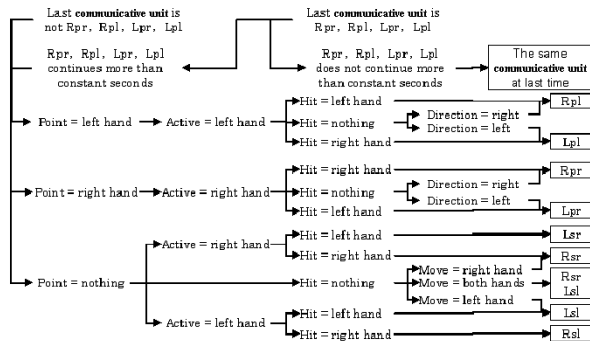


Fig. 8 Rules for selecting communicative units for Arm movements

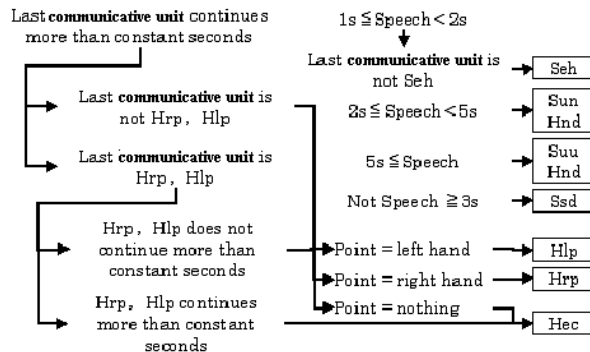


Fig. 9 Rules for selecting communicative units for Head movements and Voice

ションキャプチャシステムとマイクフォンからの入力を基に以下の6状態を判別する。

Point : 右(左)手を使って指さしを行っているか

Direction : ロボットから見て右側を指しているか
それとも左側を指しているか

Move : 右(左)手が動いているか
(動きの速度が一定以上か)

Active : 右(左)手が順路案内(指さしや方向を示すジェスチャー等)に使用されているか

Hit : ロボットの右(左)手の当たる場所にいるか

Speech : 発話しているか

過去の状態は、それまでに選択されたコミュニケーションユニットを基に以下の5状態を判別する。

- 頭部の行動モジュールが過去一定秒続いているか
- Hrp または Hlp が過去一定秒続いているか
- Rpr, Rpl, Lpr, Lpl が過去一定秒続いているか
- 過去一定秒間の手の動きはどの程度か
- 前回にロボットが何と発話したか

[ユニット選択部] 前節に示した抽出されたオペレータの操作ポリシーに基づき、コミュニケーションユニットのユニット選択部 (unit selector) を実装した。ユニット選択部は人間の現在の身体動作の状態および過去の身体動作の状態を基に、使用するコミュニケーションユニットを選択する選択ルールの集合からなる。実装された具体的な選択ルールを図8, 9に示す。

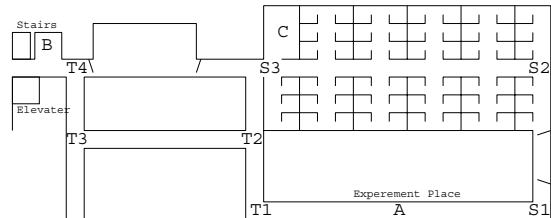


Fig. 10 Experiment environment

3. 評価実験

開発したロボットシステムの有効性を検証するため、人間の被験者が開発したロボットに道を教える実験を行った。実験に際して「聞き手であるロボットが話し手である人間と協調的動作を行うとき、人間はロボットに円滑に順路案内を行うことができる」という仮説を立て、この検証を試みた。

3.1 実験方法

本実験では、教える側の人間(以下 *Teacher* と示す)が教わる側のロボットまたは人間(以下 *Learner*)に目的地までの順路を教える。本実験の具体的な手続きは以下の通りである。

[被験者] 男女の大学生および大学院生81名が被験者として実験に参加した(男性36名, 女性45名)。被験者は実験場所を訪れたことが無く、教える・教えられる順路についてはまったく知らない。2章で述べた実験との被験者の重複は無い。

[実験条件] 実験では、聞き手(*Learner*)の協調的動作(身体動作や音声)が話し手(*Teacher*)に与える効果が検証される。このため、以下に示す Human 条件, Robot Cooperative 条件, Robot Body-move 条件, Robot Voice 条件, Robot Static 条件の5条件が用意された。中でも、ロボットを利用する Robot Cooperative 条件, Robot Body-move 条件, Robot Voice 条件, Robot Static 条件を Robot 条件(以下 R 条件)とする。

- Human 条件(以下 H 条件)
Teacher が人間に順路を教える。
- Robot Cooperative 条件(以下 Rc 条件)
Teacher が協調的動作(身体動作および音声)をするロボットに順路を教える。
- Robot Body-move 条件(以下 Rb 条件)
Teacher がロボットに順路を教える。ロボットは Rc 条件と同じものであるが、ただし音声を伴わない(つまり身体動作のみである)。
- Robot Voice 条件(以下 Rv 条件)
Teacher がロボットに順路を教える。ロボットは Rc 条件と同じものであるが、ただし身体動作を伴わない(つまり音声のみである)。
- Robot Static 条件(以下 Rs 条件)
Teacher が静止しているロボットに順路を教える。(つまりロボットは動作も音声も伴わない)。

[実験環境] 図10に実験環境の概要を示す。本実験はATR 知能ロボティクス研究所内において行われた。*Teacher* が *Learner* に順路を教える場所は実験室前の廊下(位置 A)であり、目的地はロビー(位置 B または C)である。

[実験手順] Human 条件においては人間の *Teacher* が人間の *Learner* に道案内をおこなった。つまり、2人の被験者が同時に実験に参加した。そこで、一方の被験者を被験者 A、他方の被験者を被験者 B とし、表 3 に実験順の一例を簡潔に示す。

Table 3 Experiment procedure

order	condition	Subject A	Subject B	Robot
1	H condition	<i>Teacher</i>	<i>Learner</i>	
2	R condition	<i>Teacher</i>		<i>Learner</i>
3	H condition	<i>Learner</i>	<i>Teacher</i>	
4	R condition		<i>Teacher</i>	<i>Learner</i>

各被験者は H 条件と R 条件に 1 回ずつ参加した。R 条件では Rc 条件, Rb 条件, Rv 条件, Rs 条件のいずれか 1 条件を行った。H 条件では、*Teacher* または *Learner* の両方に被験者が参加した。H 条件と R 条件実験順に関してはカウンターバランスをとった (半数の被験者は H 条件-R 条件の順に、残りの半数は R 条件-H 条件の順に実験を行った)。また、被験者の Rc 条件, Rb 条件, Rv 条件, Rs 条件への配分はランダムに行った。同様に、案内対象となる地点 (B 地点と C 地点) に関してもランダム配置を行っている。

実験前に、道を教える話し手となる *Teacher* 役の被験者は案内するロビー (B 地点または C 地点) への道を実験者に一度案内され、実際にその道を歩くことで順路を記憶する。その後、A 地点付近に連れてこられた *Teacher* は「向こうで道に迷っている人 (*Learner*) がロビーへの道を聞いてきますので、道を教えてください。その際に、最初の角を指指して「こちらの角を」と言って案内を始めてください」と教示されている。*Learner* 役の被験者は、廊下で待つように指示され、*Teacher* 役の被験者が廊下を歩いて来たときに「ロビーへの道を教えてください」と道を尋ねるように教示されている。このような教示、設定のもとで、*Teacher* 役の被験者が廊下の A 地点で立ち止まっている *Learner* 役の被験者あるいはロボットの方に歩いて行くことで実験が開始される。なお、ロボット条件 (R 条件) と人間条件 (H 条件) を均一な条件下で行うために、聞き手 (*Learner*) は、再度順路の説明を求めるような聞き返しはしないように指示されている。

[評価方法] 評価は質問紙による主観的評価と、ロボットに対する被験者の行動の比較により行った。道案内終了後、*Teacher* に *Learner* に対する主観評価を測定する質問紙への回答を求めた。質問紙ではロボットの動作が、コミュニケーションの情報伝達に関する側面、信頼感に関する側面、情緒的なコミュニケーションに関する側面に与えた影響についての質問を行った。具体的には、以下の質問項目を用いた。被験者はこれらの質問に最も低い評価を 1、最も高い評価を 7 とする 7 段階尺度の主観評価で回答した。

- 情報伝達
 - 順路を思い出すのにかかった時間
 - 相手への順路の教えやすさ
- 信頼感
 - 相手の話を聞いていた程度

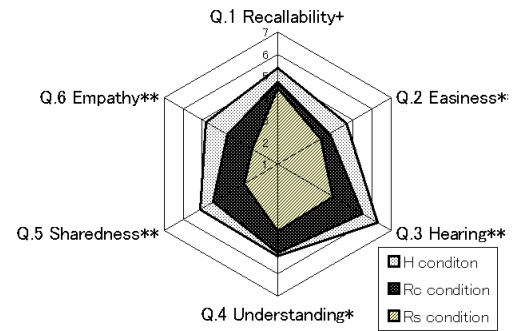


Fig. 11 Comparison of subjective evaluation between Human (H) condition, Robot cooperative (Rc) condition and Robot static (Rs) condition

- 相手の順路の理解度

• 共感

- 相手との情報の共有感

- 相手の気持ちが分かったか

被験者 (*Teacher*) の行動に関しては、以下を分析した。

- 発話量 (発話していた時間)
- 腕の動き量

3.2 実験結果

はじめに、協調動作を行ったロボットと行わなかったロボットに関する主観評価の比較を行うことにより開発したロボットシステムの有効性を検証を試みる。

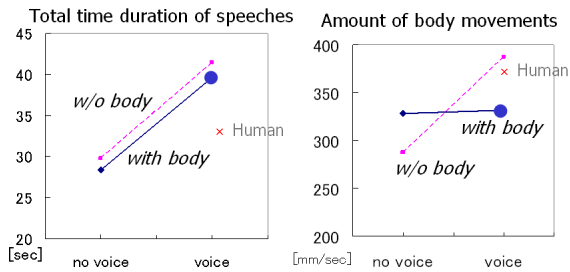
[開発したロボットシステムの有効性] 表 4 に質問票の 6 評定項目の条件ごとの平均、標準偏差、および H 条件, Rc 条件, Rs 条件間分散分析の結果を示す。平均値の後の () 内が標準偏差である。また、図 11 に各条件の主観評価の平均値のグラフを示す。各実験項目の被験者数は H 条件が 40 名, Rc 条件が 20 名, Rs 条件が 20 名である。

Q.1 から Q.6 の各項目について 1 要因被験者間の分散分析を行った結果、Q.2, Q.3, Q.4, Q.5, Q.6 において有意差があり、Q.1 に有意傾向が見られた。さらに、LSD 法による多重比較の結果、信頼感に関する Q.3 (相手の話を聞いていた程度), Q.4 (相手の順路の理解度), および共感に関する Q.5 (相手との情報の共有感), Q.6 (相手の気持ちが分かったか) に Rc 条件 > Rs 条件なる有意差が確認された。これらの結果から、人間は静止しているロボット (Rs 条件) に道案内をするよりも協調的身体動作をするロボット (Rc 条件) に順路案内をする場合の方が、質問紙調査を行った信頼感、共感の側面で主観評価が高くなること分かった。つまり、比較の結果、*Teacher* の *Learner* に対する主観評価が Rs 条件より Rc 条件の場合に有意に高くなったことから、開発したシステムの有効性が検証された。

ただし、情報伝達に関する質問 Q.1 (順路を思い出すのにかかった時間), Q.2 (相手への順路の教えやすさ) に関しては Rc 条件と Rs 条件の間に有意差は見られなかったため、情報伝達の側面に関しては開発したシステムは効果を持たなかった。また、Rc 条件への評価は H 条件に比べて Q.2, Q.3, Q.6 において有意に低くなったため、人間同士の対話に比べて開発したシステムはまだ対話の自然さに関する改善の余地があるといえる。

Table 4 Average value and analysis of subjective evaluation between Human (H) condition, Robot cooperative (Rc) condition and Robot static (Rs) condition

	Question:1	Question:2	Question:3	Question:4	Question:5	Question:6
question	Recallability	Easiness	Listening	Understanding	Sharedness	Empathy
H condition (40 subjects)	5.38(1.48)	4.68(1.44)	6.28(1.06)	5.18(1.39)	5.10(1.32)	4.78(1.23)
Rc condition (20 subjects)	4.75(1.80)	3.75(1.71)	5.50(1.60)	5.05(1.61)	4.40(1.57)	3.65(1.42)
Rs condition (20 subjects)	4.45(1.67)	3.25(1.25)	3.95(1.50)	4.05(1.28)	2.80(1.24)	2.35(1.27)
Result of ANOVA (F(2,77))	p=.090 (+) F=2.48	p<.01 (**) F=6.97	p<.01 (**) F=21.36	p=.015 (*) F=4.41	p<.01 (**) F=18.93	p<.01 (**) F=24.02
Multiple comparison	(H > Rs)	H > Rc H > Rs	H > Rc Rc > Rs	H > Rs Rc > Rs	H > Rs Rc > Rs	H > Rc Rc > Rs
MSe	2.5984 p < .05	2.1594 p < .05	1.6873 p < .05	2.0218 p < .05	1.8649 p < .05	1.6633 p < .05

**Fig. 12** Illustration of comparison of subjects' behavior to the robot

[ロボットの身体の動作と発話の影響の検証] ロボットの協調動作の効果について、身体動作による効果と、音声による効果の詳細な分析を行った。表 5 に質問票の 6 評定項目の条件ごとの平均、標準偏差、および 2 要因被験者間分散分析の結果を示す。平均値の後の () 内が標準偏差である。2 要因とは協調的身体動作の 2 要素である身体動作と音声である。Rc 条件には両要因が含まれ、Rb 条件は身体動作要因のみがあり、Rv 条件は音声要因のみがあり、Rs 条件は両要因が無い。表 5 に各条件の主観評価の平均値のグラフを示す。各実験項目の被験者数は Rc 条件が 20 名、Rb 条件が 21 名、Rv 条件が 20 名、Rs 条件が 20 名である。

Q.1 から 6 の各項目について 2 要因被験者間の分散分析を行った結果、身体動作要因の主効果に関して信頼感のうちの Q.3 に有意差、Q.4 に有意傾向が、共感に関する Q.5、Q.6 の両者において有意差が見られた。一方、音声要因の主効果に関しては共感に関する Q.5 においてのみ有意差が見られた。また、Q.3、Q.5 において身体動作要因と音声要因の間に有意な交互作用が見られた。これらの結果から、共感と信頼感は身体動作要因と音声要因の両者が影響しているものの (両者の主効果や交互作用が見られるため)、一部の項目で身体動作のみに基づく差があることから、身体動作による影響の方がより主観評価に影響すると考えられる。なお、情報伝達の側面には、身体動作要因および音声要因の影響は見られなかった。

[ロボットに対する行動の違い] 道案内実験の際の *Teacher* と *Learner* の行動を分析した結果を表 6 に示す。平均値の後の () 内が標準偏差である。ただし、モーションキャプチャシステムのデータ記録ミスにより身体動作量に関して数名の被験者が分析から省かれた。分析の結果、ロボットに対する被験者の行

Table 6 Comparison of subjects' behaviors to the robot

condition (analyzed subjects)	amount of body movements [mm/sec]	amount of utterance [sec.]
Rc (18 / 20 subjects)	332.7 (110.9)	39.7 (14.5)
Rb (20 / 21 subjects)	328.5 (108.8)	28.4 (12.3)
Rv (19 / 20 subjects)	387.4 (231.0)	41.5 (11.1)
Rs (18 / 20 subjects)	287.0 (96.6)	29.8 (14.5)
Factor of body movements	p=.846 (n.s.) F=.038	p=.577 (n.s.) F=.314
Factor of voice	p=.131 (n.s.) F=2.34	p=.000 (**) F=15.426
Interaction	p=.164 (n.s.) F=1.979	p=.951 (n.s.) F=.004

Table 7 Comparison of subjects' behaviors towards Listener (human or robots)

condition (analyzed subjects)	amount of body movements [mm/sec]	amount of utterance [sec.]
H (20 / 20 subjects)	374.3 (157.0)	33.9 (13.8)
Rc (18 / 20 subjects)	332.7 (110.9)	39.7 (14.5)
Results of ANOVA	p=.371 (n.s.) F=.821	p=.437 (n.s.) F=.616

動に関して、「発話量 (話していた時間)」と「身体動作量 (両手先の単位時間当たりの移動量の合計値)」について図 12 のような結果を得た。

図 12 左は発話量に関する比較である。二要因分散分析の結果、音声要因のみが被験者の発話量を増加させることが見出された (音声要因 $p < .01$, 身体動作要因 $p = .577$)。一方、図 12 右は身体動作量に関する比較を示す。二要因分散分析を行ったが、どちらの要因にも有意差は見られなかった。ただし、ロボットの身体動作の影響というよりも、どちらかといえば音声の影響を受けた可能性が示唆される (音声要因 $p = .131$, 身体動作要因 $p = .846$)。つまり、これらの比較から、聞き手であるロボットの音声は話し手の発話を促進する効果があったものの、ロボットの身体動作は話し手の動作には特に影響しなかったといえる。聞き手の音声による応答が話し手の発話を促進することは、人間同士の対話に関する従来の心理学研究の知見と一致する [22]。

4. 考 察

4.1 協調的身体動作の有用性 [実験結果のまとめ]

Table 5 Comparison of subjective evaluation among Robot conditions

question	Question:1	Question:2	Question:3	Question:4	Question:5	Question:6
	Recallability	Easiness	Listening	Understanding	Sharedness	Empathy
Rc condition (20 subjects)	4.75(1.80)	3.75(1.71)	5.50(1.60)	5.05(1.61)	4.40(1.57)	3.65(1.42)
Rb condition (21 subjects)	4.43(1.80)	3.67(1.74)	5.76(0.89)	4.57(1.54)	4.38(1.50)	3.76(1.51)
Rv condition (20 subjects)	5.05(1.54)	3.35(1.42)	5.15(1.27)	4.45(1.32)	4.40(1.23)	3.00(1.26)
Rs condition (20 subjects)	4.45(1.67)	3.25(1.25)	3.95(1.50)	4.05(1.28)	2.80(1.24)	2.35(1.27)
Factor of body movements F(1,77)	p=.681 (n.s.) F=0.17	p=.239 (n.s.) F=1.41	p<.01 (**) F=13.76	p=.084 (+) F=3.06	p=.013 (*) F=6.50	p<.01 (**) F=11.43
Factor of voice F(1,77)	p=.229 (n.s.) F=1.47	p=.792 (n.s.) F=0.07	p=.112 (n.s.) F=2.59	p=.174 (n.s.) F=1.88	p=.011 (*) F=6.82	p=.383 (n.s.) F=0.77
Interaction F(1,77)	p=.719 (n.s.) F=0.13	p=1.00 (n.s.) F=0.00	p=.014 (*) F=6.29	p=.921 (n.s.) F=0.01	p=.013 (*) F=6.50	p=.215 (n.s.) F=1.56

実験結果は、時間的・空間的な協調的動作に基づいて教え手の道案内に反応する「聞いたふり」ロボットシステムの有効性を示すものであった。主観評価の結果に加えて、実験後に被験者に自由記述形式で回答を求めた質問紙においても「ロボットの身振り手振り、頷き、相槌によって相手が理解していることが分かった」といった回答が得られたことから、聞き手役のロボットが無反応な場合と比べて、協調的身体動作に基づき話し手の行動に反応するロボットシステムの効果が示されたといえる。もちろん「聞いたふり」というのは本研究のねらいが身体を用いたコミュニケーションの部分にあるからであり、本研究の成果に加えて音声認識を用いて言語的な内容を理解する機能を追加することで真に発話を理解して、話し手の説明を「聞いて理解している」ことを示すロボットが実現されるであろう。

さらに音声と身体動作の影響に関する詳細な分析の結果、聞き手であるロボットの身体動作と音声の両要因がどちらも教え手の発話に対して「聞いていること」を示す効果があったものの、主観評価の一部の項目で身体動作のみが有意差を生じさせたことからロボットの身体動作の方が主観評価に関しては効果があったことが示唆される。一方、ロボットの音声には話し手の発話を促進する効果が見られたが、ロボットの身体動作にはこのような効果は見られなかった。つまり、ロボットが音声によって反応することは、話し手がロボットに対して十分な説明を行うように発話を促進し、ロボット側の言語理解を助ける可能性が示唆される。このように、話し手の主観的印象を向上し、かつ話し手からロボットに話される言語的な内容を十分に引き出すような「聞いたふり」行動のためには、身体動作と音声の両者を兼ね備えることが重要であると考えられる。

この結果は従来の HCI 分野の研究結果とも近い。Whittaker&O' Conaillらはビデオ会議システムを通じたコミュニケーションを分析する中で音声と映像の効果を比較し、タスクの遂行は主に音声により行われ、映像からは感情に関する情報が伝達されたことを見出した[23]。本研究ではタスクが物理的な実空間の情報に関連したものであることから、身体動作の効果が共感のような感情面のみならず、相手の話を聞いている度合いに関する信頼感といった直接タスク遂行に関与する部分にも影響を及ぼしたのではないかと考えられる。つまり、道案内のような実空間でのタスクの場合には、HCI 分野で従来扱われてきた画面上や仮想空間内のタスクの場合に比べて、人間型ロボットの身体動作のような実空間性の高いメディアの効果が高

まる可能性が示唆された。

【情報伝達の側面への影響】

ロボット対話の従来研究で、ロボットが話し手としてゼスチャを行った場合には、聞き手の身体動作を引き起こし、また順路案内の理解を促進することが見出されている[7]。本研究のひとつのねらいは、この逆に聞き手のゼスチャが話し手の情報を引き出す手助けをするのかを検証することにあった。

しかし、情報伝達の側面に関する主観評価の結果の比較(表4, Q.1,2)からは聞き手のロボットの動作による影響には有意差はみられず、影響があったとしても非常に小さいであろうことが推察される。つまり、現時点ではロボットが身体動作や音声発話を行うことにより話し手が順路を思い出し、あるいは教えることを容易にする影響は小さい。一方、人間(H条件)に対しては、静止ロボット(Rs条件)よりも情報伝達の側面で高い評価を受ける、つまり順路を教えやすいとの結果が出ていることは、聞き手が静止しているロボットでは不都合があることを示している。さらに、H条件 > Rc条件なる有意差も見られており、この部分はロボットの外見や「ロボットが人間の話を理解することへの期待感がまだ低い」といった社会的要因も含めて、まだロボットが人間ほど良い聞き手になっていないことを示しているようである。

【得られた結果の一般性・拡張性】

今回の実験には Robovie の外見に依存した要素はなく、むしろそれほどデザイン的に洗練されたわけではないロボット(Robovie)で生じた現象であるため、我々は本実験の結果は他のデザイン的に洗練された外見をもつ(あるいは同程度の外見の)人間型ロボットに適用できるものであると考える。しかし、Robovieよりも限定された機能のロボット、たとえば頭部と移動機構を持つが腕を持たない人間型ロボット、頭部のみ人間型ロボット、腕のみのロボット等での程度当てはまるのかについては明らかではない。つまり、腕と頭部、移動機構といったおおまかな自由度が同程度(以上)の擬人的な外見を持つ人間型対話ロボットの範囲において、一般性を持つと考える。

評価実験の結果は、協調的身体動作をするロボットがある程度の効果をもたらしたものの、人間同士が会話した場合ほどの効果は持たないことを示した。しかし、我々はこの結果は現在の実装によってもたらされたものであり、ロボットが理想的に振舞った場合に人間と比べて共感、信頼感、情報伝達の側面で劣るものであることを示しているわけではないと考える。そも

そも、人間の聞き手も必ずしも理想的な反応動作をしているわけではなく、中にはあまり積極的に反応を返さない人もいる。むしろ、さらなる身体動作や基本的な発話の抽出により、特にコミュニケーションユニット追加による性能向上を試みることで、「平均的な」人間程度には良い評価を得られるロボットを開発することも近い将来可能であると考え。ただし、このためには、顔表情といった繊細な表現デバイスの利用が必要になる可能性がある。さらに、得られた知見は、近い将来実現するであろう公共の場などで活躍する人間型ロボットに直ちに応用可能なものである、つまり実用への拡張が可能であると考え。また、アンドロイドロボットなど異なる外見のロボットへの適用による一般性の拡張も重要になると考える。

4.2 人間同士の対話との比較

[人間同士の対話との比較]

本研究で開発したロボットと被験者の対話と人間同士の対話との比較を行った結果、主観に関しては表 4 に示すように、Q.1(順路を思い出すのにかった時間)、Q.4(相手の順路の理解度)、Q.5(相手との情報の共有感)においては人間同士の場合(H条件)と開発したロボット(Rc条件)に有意差、有意傾向が無く、開発したロボットは人間同士の場合に比較的近い評価を得ることが出来たと言える。一方、Q.2(順路の教えやすさ)、Q.3(相手の話が分かった程度)、Q.6(相手の気持ちが分かった程度)において、H条件 > Rc条件なる有意差が検出されているように、まだ人間同士の対話と同程度の自然さには至っていないことも明らかである。

話し手の聞き手への行動に関して人間同士の対話(H条件)と人-ロボット対話(Rs条件)の比較を行ったが、統計的に有意差はみられなかった(表 7)。一方、質問紙での自由記述の回答から、被験者のロボットへの教え方は人間に教えた場合と比べて「子供に話すように話した」「簡単な目印(ランドマーク)を説明に使った」「ゆっくりと大きな声で話した」「詳しく説明した」「単純に説明した」といった意図的に異なる行動をしたことが報告された。

本研究で開発したような対話型ロボットの評価は一般に難しい。特定の機能の有無といった相対的な比較は行えるが、従来の産業用ロボットのような速度・精度といった絶対的尺度での評価基準はない。ただし、人間同士の行うような自然な対話を目指す場合には、実現された対話が人間同士の場合にどの程度近づいたのか、といった評価基準を考えることは可能であろう。このような比較は、異なるロボット、異なるアルゴリズム間の性能を比較する指標となりうるため、今後の研究を進める上で人間同士の対話の場合との比較を示すことは有益であると考え。

[比較の信頼性]

このような人間同士の対話と比較した主観評価や行動の違いは社会的要因に影響を受けるため、絶対尺度としての評価基準になるわけではない。ロボットが珍しい間はロボットが動いただけでも非常に高い評価を受けるが、徐々にこのような効果は弱まるだろう。たとえば、二足歩行型ロボット [1] が安定して歩くことが報道された当初はロボットを歩くことに感動していた人も、今ではロボットが歩くことは当たり前のように感じる。

同様に、人型ロボットと自然に身体を使った対話ができることが当然の時代が来れば、ロボットはより厳しい基準での主観評価を受ける可能性が高い。一方で、被験者のロボットに対する行動も社会的要因の影響を受ける。本実験に参加した被験者には、ロボットは人間の話を理解しないだろうという予想をしている者も見られた。たとえば、ある被験者は自由記述の質問紙に「ロボットに話しても分からないんじゃないかと思った」「分かってもらえるか不安に思った」といった回答をよせている。また「ロボット相手には緊張した」といった報告もあり、これらの社会的要因を背景とした違いがロボットへの行動の違いの一要因となっているであろうことが推測される。

5. おわりに

本稿では、人間同士の対話や人-ロボット対話で聞き手の人に見られるアイコンタクトや腕の動きの同調といった協調的動作に基づき、話し手の話を「聞いたふり」をするために身体動作と音声発話を行うロボットシステムの開発について報告した。評価実験の結果、開発したロボットシステムはロボットが身体動作や発話を行わない場合に比べて人間の話し手の信頼感や共感に関する主観評価を向上させる効果が見られた。また、身体動作と音声それぞれの効果の寄与に関して分析したところ、主観評価に関しては身体動作と音声の両者が関与しているものの身体動作の影響が大きいことが示唆され、またロボットに対する音声発話はロボットの音声による反応により促進されることが見出された。頭部と腕、音声を話し手の動作に応じて反動的に動かすことで完全自律の人間型ロボットの「聞いたふり」動作が実現されたことは、今後ますます重要となる人間と自然な対話を行うロボット開発に有用であるといえる。

謝辞 本研究は通信・放送機構の研究委託「超高速知能ネットワーク社会に向けた新しいインタラクション・メディアの研究開発」により実施したものである。

参考文献

- [1] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, The development of the Honda humanoid robot. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1321-1326, 1998.
- [2] T. Minato, M. Shimada, H. Ishiguro, and S. Itakura, Development of an Android Robot for Studying Human-Robot Interaction, *Proc. Int. Conf. on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems (IEA/AIE)*, pp.424-434, 2004.
- [3] B. Reeves, and C. Nass, *The media equation*, 1996.
- [4] J. Cassell, T. Bickmore, M. Billinghurst, L. Campbell, K. Chang, H. Vilhjalmsson, and H. Yan, Embodiment in conversational interfaces: Rea. *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'99)*, 520-527, 1999.
- [5] Y. Nakano, G. Reinstein, T. Stocky, and J. Cassell, Towards a model of face-to-face grounding, *Proc. Association for Computational Linguistics*, pp. 553-561, 2003.
- [6] C. Kidd and C. Breazeal. Effect of a Robot on User Perceptions, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2004)*, 2004.
- [7] 小野哲雄, 今井倫太, 石黒浩, 中津良平. 身体表現を用いた人とロボットの共創対話, *情報処理学会論文誌*, Vol. 42, No. 6, pp. 1348-1358, 2001.

- [8] M. Imai, T. Ono, and H. Ishiguro, Physical relation and expression: Joint attention for human-robot interaction. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 50, No. 4, pp. 636-643, 2003.
- [9] K. Nakadai, K. Hidai, H. Mizoguchi, H. G. Okuno, and H. Kitano, Real-Time Auditory and Visual Multiple-Object Tracking for Robots, *Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI2001)*, pp. 1425-1432, 2001.
- [10] B. Scassellati, Investigating Models of Social Development Using a Humanoid Robot, *Biorobotics*, 2000.
- [11] H. Kozima and E. Vatikiotis-Bateson, Communicative criteria for processing time/space-varying information, *IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN2001)*, 2001.
- [12] H. Ogawa and T. Watanabe: InterRobot: speech-driven embodied interaction robot, *Advanced Robotics*, Vol. 15, No. 3, pp. 371-377, 2001.
- [13] C. Breazeal, and B. Scassellati, Infant-like Social Interactions between a Robot and a Human Caregiver, *Adaptive Behavior*, 8, 1, 49-74, 1999.
- [14] 尾形哲也, 菅野重樹, 人間とロボットの情緒的コミュニケーションの実験的評価 - アームハンドによる人間との物理的インタラクション, システム制御 情報学会論文誌, Vol.13, No.12, pp.566-574, 2000.
- [15] N. Furuyama, Gestural interaction between the instructor and the leaner in origami instruction. In McNeill, D. (ed.), *Language and gesture*, pp. 99-117, Cambridge Univ. Press.
- [16] 神田崇行, 今井倫太, 小野哲雄, 石黒浩, 人-ロボット相互作用における身体動作の数値解析, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.11, pp. 2699-2709, 2003
- [17] T. Kanda, H. Ishiguro, M. Imai, T. Ono, Development and Evaluation of Interactive Humanoid Robots, *Proceedings of the IEEE*, Vol.92, No.11, pp.1839-1850, 2004.
- [18] C. Moore and Philip J. Dunham eds, *Joint Attention: Its Origins and Role in Development*, Lawrence Erlbaum Associates, 1995.
- [19] T. Kanda, H. Ishiguro, M. Imai, T. Ono and K. Mase, A constructive approach for developing interactive humanoid robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2002)*, pp. 1265-1270, 2002.
- [20] D. Sakamoto, T. Kanda, T. Ono, M. Kamashima, M. Imai, H. Ishiguro, Cooperative Embodied Communication Emerged by Interactive Humanoid Robots, *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN2004)*, 2004.
- [21] D. Sakamoto, T. Kanda, T. Ono, M. Kamashima, M. Imai, and H. Ishiguro, Cooperative embodied communication emerged by interactive humanoid robots, *International Journal of Human-Computer Studies*, 2005. (to appear)
- [22] 塚原さち子, 花沢成一, 対人的コミュニケーション場面におけるあいづちの効果について, 日本心理学会第 61 回大会発表論文集, p.134, 1997.
- [23] S. Whittaker and B. O'Conaill, The role of vision in face-to-face and mediated communication, In K. Finn, A. Sellen, and S. Wilbur (Eds.), *Video Mediated Communication*, pp.23-49, Lawrence Erlbaum Associates, 1997.

神田 崇行 (Takayuki Kanda)

1975 年 12 月 7 日生 . 1998 年京都大学工学部情報工学科卒業 . 2000 年同大学大学院情報学研究科社会情報学専攻修士課程修了 . 2003 年同専攻博士課程修了 . 博士 (情報学) . 現在, ATR 知能ロボティクス研究所上級研究員 . ヒューマンロボットインタラクション, 特にロボットの自律対話機構や社会的能力, 人間型ロボットの身体を利用した対話に興味を持つ .

(日本ロボット学会正会員)

鎌島 正幸 (Masayuki Kamasima)

1979 年 6 月 6 日生 . 2002 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業 . 2004 年, 同大学大学院理工学研究科修士課程卒業, 2002 年 2 月から 2004 年 3 月まで ATR 知能ロボティクス研究所学外実習生 . 現在, (株)SONY に勤務 .

今井 倫太 (Michita Imai)

1992 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業 . 1994 年同大学大学院計算機科学専攻修士課程修了 . 同年, NTT ヒューマンインターフェース研究所入社 . 1997 年より ATR 知能映像通信研究所研究員を経て, 現在, 慶應義塾大学理工学部専任講師, ATR 知能ロボティクス研究所客員研究員, 科学技術振興事業団さきがけ研究 21 研究員 . 博士 (工学) . ロボットとの対話, センサを用いた状況知覚に興味を持つ .

小野 哲雄 (Tetsuo Ono)

1997 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了 . 同年より ATR 知能映像通信研究所客員研究員 . 2001 年公立はこだて未来大学システム情報学部情報アーキテクチャ学科助教授, ATR 知能ロボティクス研究所客員研究員 . 博士 (情報科学) . 感情の計算モデル, マルチエージェントモデルによる共通言語の組織化, ヒューマンロボットコミュニケーションに関する研究に従事 . 認知科学会, 人工知能学会各会員 .

坂本 大介 (Daisuke Sakamoto)

現在, 公立はこだて未来大学システム情報学部情報アーキテクチャ学科在学中 . 2003 年 6 月から 2003 年 8 月まで ATR 知能ロボティクス研究所学外実習生 . 平成 14 年度未踏ソフトウェア創造事業コース部門において「心のぞき窓」プロジェクト, 平成 15 年度未踏ソフトウェア創造事業において「共感する部屋」を提案し, 採択された . 情報機器との共創対話に興味を持つ .

石黒 浩 (Hiroshi Ishiguro)

1963 年 10 月 23 日生 . 1991 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士課程修了 . 工学博士 . 同年山梨大学工学部情報工学科助手, 1992 年大阪大学基礎工学部システム工学科助手 . 1994 年京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻助教授 . 2001 年, 和歌山大学システム工学部情報通信システム学科教授 . 現在, 大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻教授 . 視覚移動ロボット, 能動視覚, パノラマ視覚, 分散視覚に興味を持つ . 人工知能学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, IEEE, AAAI 各会員 .

(日本ロボット学会正会員)

安西 祐一郎 (Yuichiro Anzai)

1974 年慶應義塾大学大学院博士過程修了 . 工学博士 . 慶應義塾大学工学部助手, 北海道大学文学部助教授, 慶應義塾大学理工学部長を経て, 現在慶應義塾長 . 1981~82 年カーネギーメロン大学客員助教授 . 計算幾何学, 認識の情報処理過程の研究に従事 . 著書に「認識と学習」(岩波書店), 「知識と表象」(産業図書), 「問題解決の心理学」(中央公論社), 「脳科学の現在」(共著, 中央公論社), 「認知科学のハンドブック」(共著, 共立出版) など . 訳書に「心の社会」(ミンスキー, 産業図書) .